



### **III-368 - PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES COM ENFOQUE NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

**Cláudio Jorge Cançado<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil e Sanitarista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutor em Ecologia e Recursos Naturais pela UFSCar. Pesquisador da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. Professor do Curso de Engenharia Civil e de Engenharia Ambiental do Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix. Coordenador do Curso de Especialização em Gestão do Meio Ambiente: Mineração e Recursos Hídricos da Faculdade Pitágoras.

**Emerson Ribeiro Lessa**

Engenheiro Civil e Sanitarista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Área de Concentração: Saneamento Ambiental. Pesquisador pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.

**Carlos Renato Clementino Rocha**

Engenheiro Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC. Consultor Técnico pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua José Sérgio de Paula, 172 apto 201 - Belo Horizonte - MG - CEP: 31910-270 - Brasil - Tel: (31) 3489-2257 - e-mail: [claudio.cancado@cetec.br](mailto:claudio.cancado@cetec.br)

#### **RESUMO**

A maioria das grandes e médias cidades tem apresentado problemas com a destinação final dos resíduos sólidos domiciliares. O município de Belo Horizonte, recentemente, encerrou as atividades de operação do seu aterro sanitário por motivo de saturação de área e enfrenta dificuldades para encontrar uma solução de destinação final de seus resíduos. Dentro deste escopo, como observado em países europeus, o aproveitamento energético dos resíduos sólidos domiciliares, a partir de processos de gaseificação e queima, pode ser uma alternativa viável para tais problemas, apresentando-se como uma possibilidade de solução, dentre elas, citam-se a diminuição do impacto ambiental da destinação final de resíduos no solo, a necessidade de áreas para aterramento, a possibilidade de geração de energia elétrica, entre outros.

Sendo assim, o presente trabalho propõe uma metodologia para a determinação do poder calorífico superior e inferior dos resíduos sólidos domiciliares do município de Belo Horizonte, analisando-se as áreas de estudo em função de sua estratificação sócio-econômica. Além da utilização de modelos matemáticos em função de sua composição química (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre) para comparação dos resultados obtidos em laboratório.

Os estudos realizados até o momento indicam a necessidade de se avaliar as amostras de maneira sazonal, isto é, analisar as características dos resíduos em diferentes épocas do ano devido a fatores como umidade, quantidade e composição dos mesmos que podem alterar significativamente os resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Potencial energético, resíduos sólidos domiciliares, poder calorífico, gestão de resíduos sólidos urbanos, meio ambiente.

#### **INTRODUÇÃO**

Todos reconhecem que a escassez de energia elétrica e a falta de áreas adequadas para a disposição final dos resíduos constituem-se em dois graves problemas com que se defronta o Brasil na atualidade. A produção de energia elétrica a partir de resíduos sólidos domiciliares se constitui uma solução factível, resolvendo esses dois problemas com uma única solução.

Além disso, sempre haverá necessidade de diversificarmos a matriz energética do país, independente do momento de crise, sendo observado em inúmeros trabalhos a necessidade de se melhorar o planejamento e a gestão sobre este tema, embora não haja um total consenso sobre esta questão, além do aumento do consumo, quando houver a retomada do crescimento econômico, após a passagem das turbulências observadas na



economia mundial recentemente. Além disso, processos de tratamento de Resíduos Sólidos Domiciliares - RDO que envolvem a aplicação de Plasma, incineração e outros se tornam economicamente mais atraentes em virtude, principalmente, da geração de energia.

O local de disposição de RSU em Belo Horizonte está com a capacidade exaurida. Desta forma, o município de Belo Horizonte busca novas áreas para disposição ou tecnologias alternativas para tratamento/disposição dos RSU. Além disso, o problema de disposição final do lixo tem se apresentado de difícil solução para uma boa parcela dos municípios, sendo observado um grande potencial destes resíduos para a geração energética. Desta forma, o conhecimento do poder calorífico do RSU é fundamental para a elaboração de projetos para tratamento e geração de energia.

Logo, deve-se definir as características e peculiaridades dos resíduos sólidos domiciliares da região de estudo, em especial daqueles gerados nos domicílios e comércios, em função do percentual orgânico gerado, para a definição de tecnologias aplicáveis aos resíduos da região, avaliando seu potencial para geração de energia.

O trabalho tem por objetivo uma proposta metodológica de determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos domiciliares com vistas à geração de energia, usando como estudo de caso o município de Belo Horizonte.

O desenvolvimento desse trabalho conta com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Os autores agradecem à Unidade Estadual de Minas Gerais do IBGE, ao Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais, à PRODABEL e à empresa VirtualCad pelo apoio prestado para a execução do presente trabalho.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente estudo metodológico tem como foco a caracterização qualitativa dos resíduos sólidos domiciliares no que tange a questão do potencial energético. A determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos domiciliares a partir de ensaios laboratoriais e modelos matemáticos desenvolvidos especificamente para tal fim, define tal estudo. Visando esta determinação, optou-se pela seguinte seqüência metodológica:

1. Levantamento dos dados das regionais, dos dados dos setores censitários e escolha do tamanho das amostras para o município de Belo Horizonte: Utilizou-se a técnica de amostragem por residência/comércio, dividindo-se o município em setores, a partir de uma estratificação sócio-econômica feita com os dados do IBGE, onde se trabalhará com 5 estratos sócio-econômicos (A, B, C, D e E) da estrato mais baixo (E) ao estrato mais elevado de renda (A), visando uma maior representatividade das amostras coletadas. Esta estratificação foi realizada, segundo a seguinte distribuição: Estrato E – de 0 a 2 salários mínimos, Estrato D – acima de 2 salários mínimos até 6 salários mínimos, Estrato C – acima de 6 salários mínimos até 12 salários mínimos, Estrato B – acima de 12 salários mínimos até 20 salários mínimos e Estrato A – acima de 20 salários mínimos.
2. Coleta das amostras e caracterização dos resíduos sólidos domiciliares do município de Belo Horizonte: após a seleção das residências, cada uma deverá ser visitada em horários adequados, com um ou dois dias de antecedência da coleta, quando deverá ser entregue ao morador sacos plásticos para o armazenamento dos resíduos. O tamanho da amostra selecionada será em função do número de habitações do setor e o grau de confiança desejado. O número de amostra será determinado estatisticamente e de maneira aleatória, dentro dos critérios de estratificação sócio-econômica de cada regional. No dia da coleta, as amostras serão coletadas e identificadas com etiquetas contendo o endereço da residência, o número de pessoas que residem no domicílio e a quantidade de dias de geração de resíduos. Com as amostras já identificadas e registradas, estas serão transportadas para um local adequado para a etapa de caracterização física. Será utilizada uma balança de precisão, máscaras, luvas e planilha para a anotação dos resultados. Primeiramente, as amostras serão pesadas e será anotado o peso total da amostra. Em seguida, a sacos serão abertos e espalhados os resíduos, para agrupá-los de acordo com a seguinte tipologia: matéria orgânica (restos de comida, vegetais e folhas); potencialmente recicláveis (papel, plástico, metal e vidro); outros (tecidos, cerâmica, madeira, borracha e lâmpadas) e rejeitos. Os diferentes tipos de resíduos serão pesados separadamente e os resultados anotados em planilha.

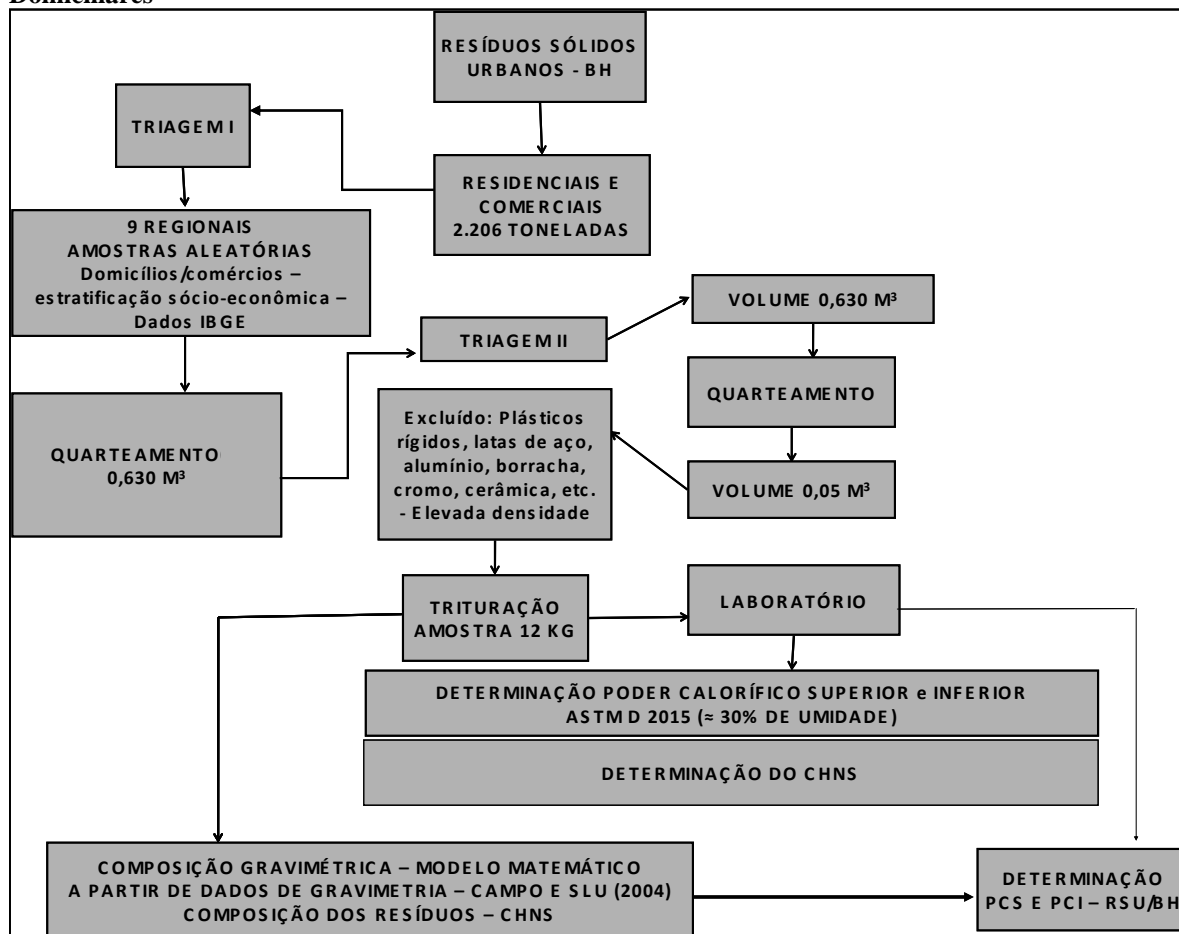


3. Preparação das amostras para as análises em laboratório: Os resíduos coletados por regional serão dispostos sobre uma lona plástica e desensacados, a fim de se promover a homogeneização da amostra. Posteriormente, serão promovidos quarteamentos até a obtenção de uma amostra de, aproximadamente,  $0,05 \text{ m}^3$  para a etapa de trituração dos resíduos. Para a trituração, deverão ser retirados os plásticos rígidos, latas de aço e alumínio, borracha, couro, cerâmica, entre outros de elevada densidade, pois o equipamento especificado não suportaria triturar tais resíduos. A massa final de resíduos de cada etapa da campanha de amostragem, por regional, para a análise laboratorial será de, aproximadamente, 12 kg de resíduos. Serão identificados e devidamente anotados os resíduos descartados.
4. Determinação do Poder Calorífico Superior e Inferior (PCS e PCI): O método de determinação do poder calorífico baseia-se na combustão completa da amostra, em geral com oxigênio puro, a volume constante, e na transferência de calor para certa quantidade de água contida em um calorímetro, segundo Norma ASTM D 2015 com algumas modificações experimentais. O poder calorífico divide-se em poder calorífico superior e inferior. A diferenciação entre o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) resulta da consideração do estado final da mistura de gases de combustão e do vapor d'água que se forma na queima de substâncias hidrogenadas. Se o estado de equilíbrio térmico dos produtos da combustão com a água do calorímetro ocorre sem a condensação do vapor d'água, o poder calorífico medido é o inferior; se o vapor se condensa e a mistura é resfriada à temperatura inicial (geralmente a do ambiente, tomada como  $25^\circ\text{C}$ ), maior quantidade de calor é cedida ao calorímetro e o resultado obtido é o poder calorífico superior.
5. Determinação de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre: Visando complementar os resultados obtidos pela determinação do PCS, utilizar-se-á modelos matemáticos que foram desenvolvidos baseados nos resultados laboratoriais de composição gravimétrica, análise elementar ou análise física. Dessa forma, far-se-á a determinação tanto do conteúdo de hidrogênio, como de carbono, nitrogênio e enxofre de um material pode, na maioria das vezes, ser realizada utilizando-se um analisador de CHNS/O. A análise consiste na combustão da amostra para transformar elementos da mesma em gases simples ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$ ). A amostra é oxidada em um ambiente contendo oxigênio puro e utilizando reagentes clássicos. Na zona de combustão, além dos gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$  existem compostos halogenados e compostos contendo enxofre que são removidos por reagentes específicos. Os gases homogeneizados são despressurizados através de uma coluna, sendo então separados e detectados em função da condutividade térmica, obtendo-se assim, os teores desejados. A determinação do teor de carbono também é importante para materiais combustíveis já que o teor de carbono está intimamente relacionado com a eficiência dos processos de decomposição biológica ou incineração de um determinado material. Além de possibilitar o cálculo do valor de PCI, o conhecimento do teor de hidrogênio pode, ainda, indicar parcialmente a quantidade de material plástico presente em um dado resíduo.
6. Aplicação dos modelos matemáticos: De posse dos resultados da determinação do CNHS e dos dados provenientes da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares amostrados, far-se-á a aplicação dos resultados obtidos em cada amostra, depois uma média aritmética dos mesmos por regional e do valor médio encontrado de cada regional, visando encontrar um valor de PCS médio para os resíduos sólidos domiciliares do município de Belo Horizonte, a partir da aplicação de modelos matemáticos, segundo Kathiravale *et al* (2003).
7. Análise dos Resultados: A partir dos resultados obtidos pelos dois métodos (determinação do PCS e PCI, e do CNHS), far-se-á uma comparação dos resultados obtidos no intuito de avaliar a consistência dos mesmos e analisar qual melhor se aplica a realidade do município de Belo Horizonte, definindo-se, desta maneira, um valor de referência do potencial energético do resíduo sólido domiciliar da área de estudo.

A Figura 01 apresenta, de forma esquemática, o processo de determinação do poder calorífico da massa de resíduos sólidos domiciliares.



**Figura 01: Fluxograma do Processo de Determinação do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Domiciliares**



## DISTRIBUIÇÃO DE RENDA POR REGIONAL

Nas figuras de 2 a 10, apresentam-se as cartas da estratificação sócio-econômica por regional no município de Belo Horizonte, segundo dados do Censo de 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e dados fornecidos pela Empresa de Informática e Informação de Belo Horizonte – PRODABEL.

**Figura 2: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Barreiro – Belo Horizonte.**

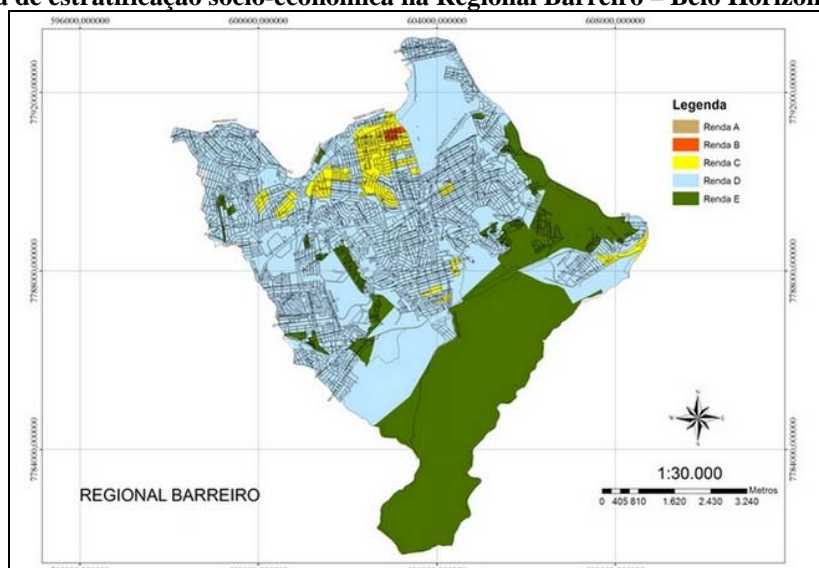




Figura 3: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Centro-Sul – Belo Horizonte.

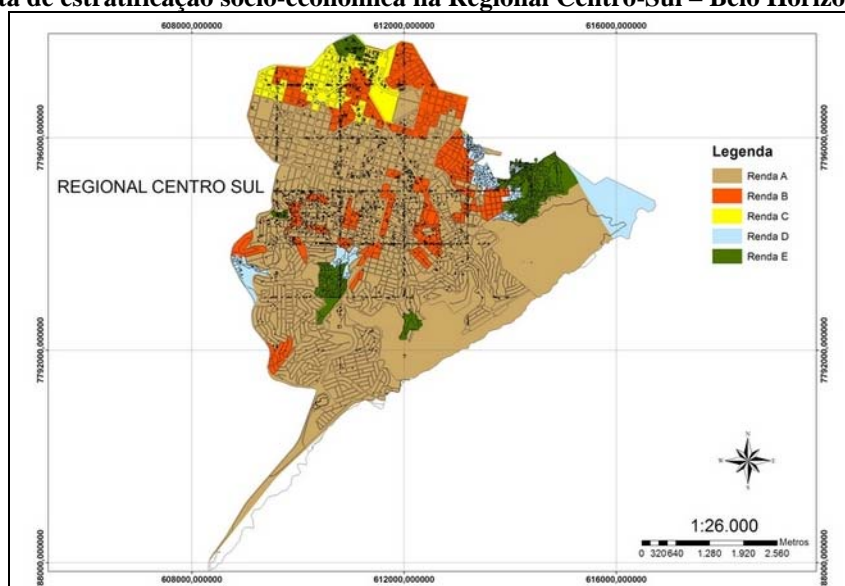


Figura 4: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Leste – Belo Horizonte.

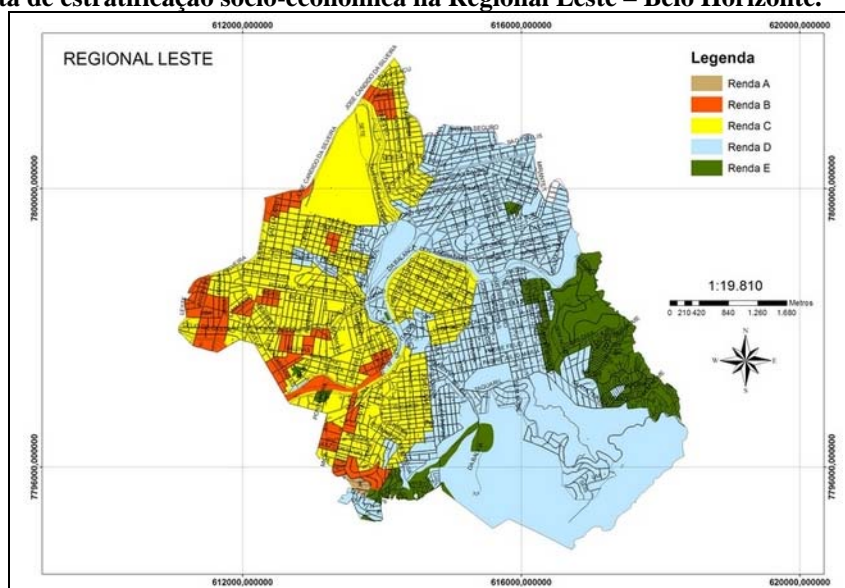


Figura 5: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Nordeste – Belo Horizonte.

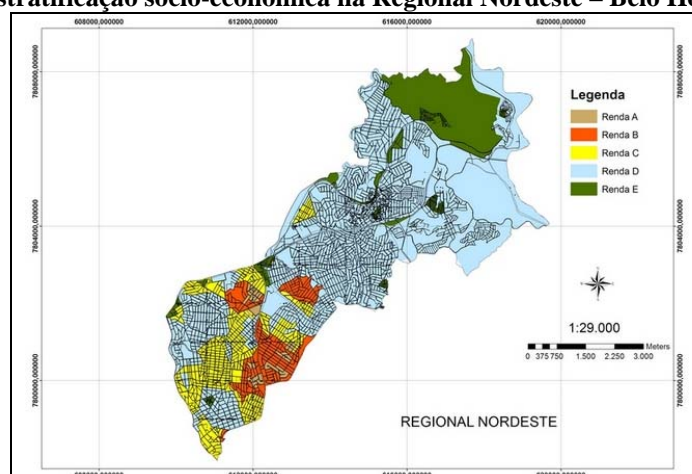






Figura 6: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Noroeste – Belo Horizonte.

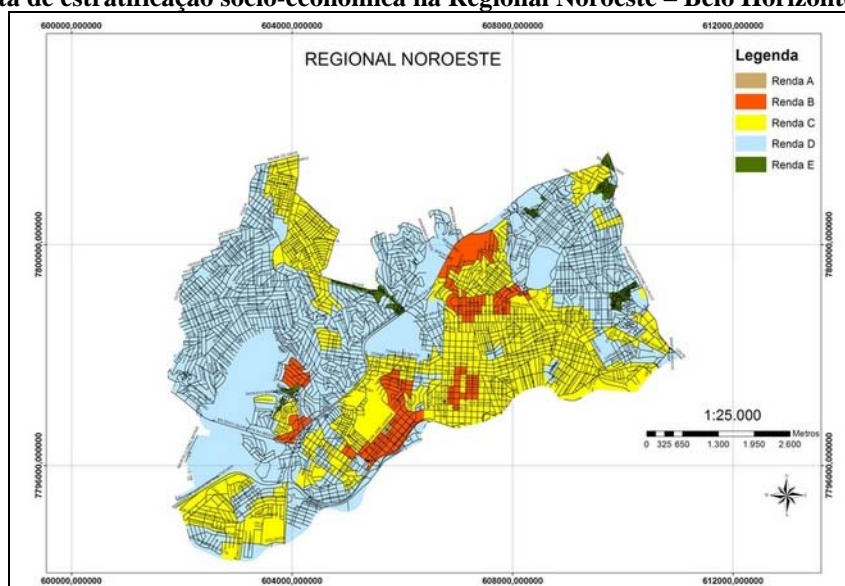


Figura 7: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Norte – Belo Horizonte.

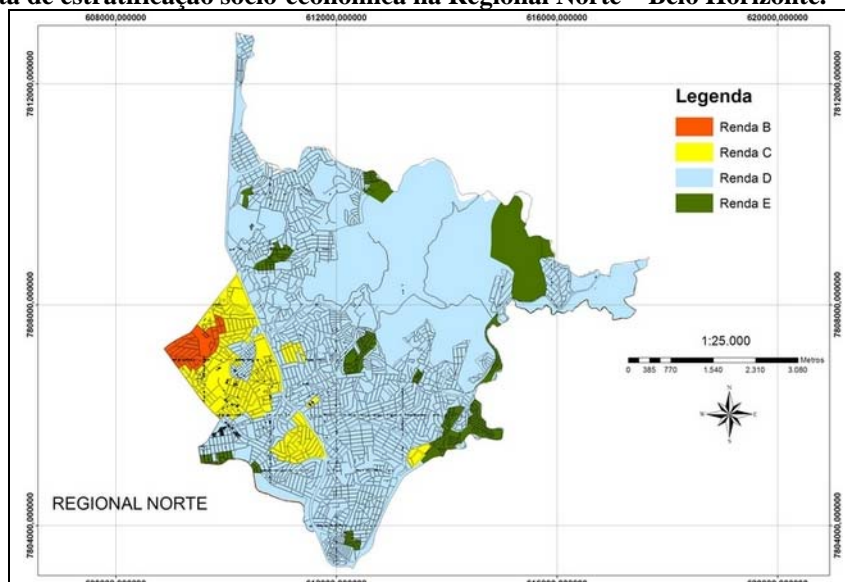


Figura 8: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Oeste – Belo Horizonte.

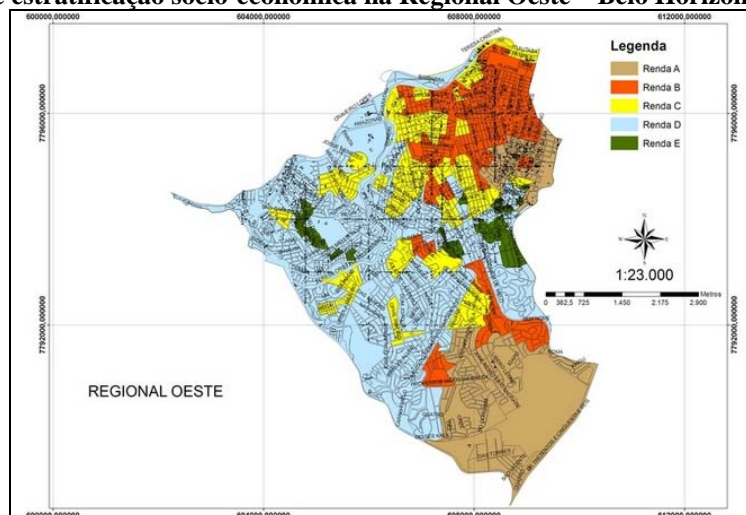




Figura 9: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Pampulha – Belo Horizonte.

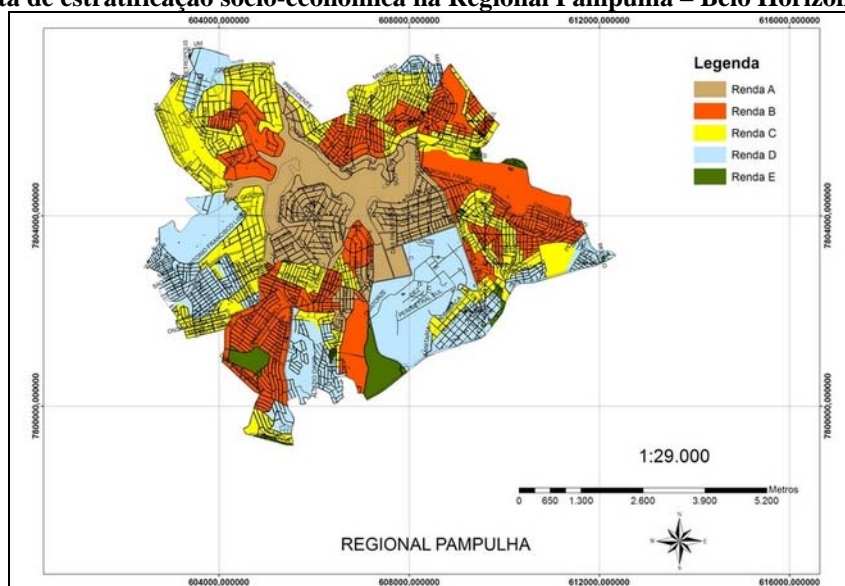
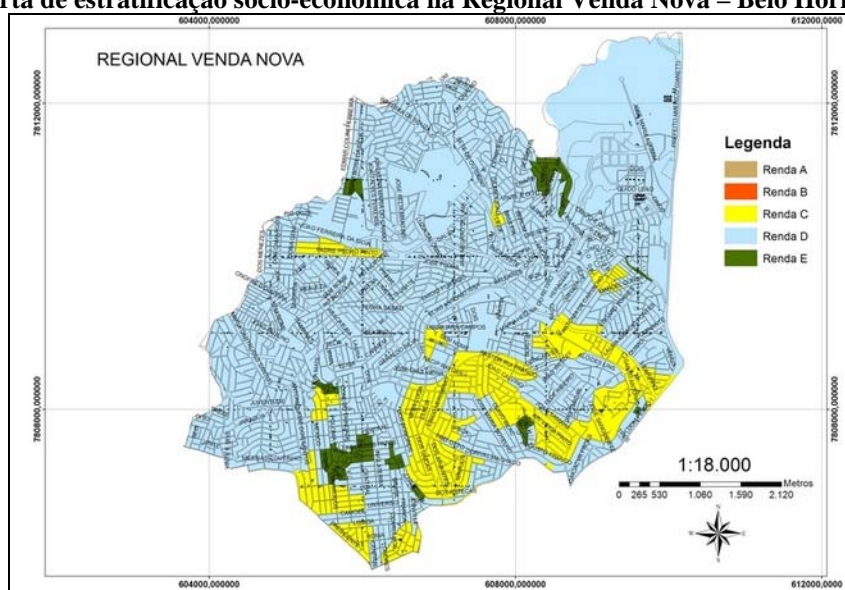


Figura 10: Carta de estratificação sócio-econômica na Regional Venda Nova – Belo Horizonte.



## RESULTADOS ESPERADOS

Segundo resultados obtidos por Cançado *et al* (2007), houve, a partir de uma comparação dos valores de PCS por diferentes modelos matemáticos com base na composição gravimétrica, a validação dos resultados laboratoriais obtidos, sendo, contudo, resultados parciais devido ao tempo disponibilizado para a coleta das amostras (Tabela 01).

Logo, espera-se com o presente trabalho determinar o valor médio obtido para o Poder Calorífico Superior de maneira a se levar em conta a questão da sazonalidade, além de se utilizar métodos matemáticos existentes que correlacionam, além da composição gravimétrica, a composição química dos resíduos sólidos domiciliares gerados, visando obter um valor cada vez mais próximo do real, visando o seu aproveitamento energético para geração de energia elétrica.



**Tabela 1: Resultados do PCS do RSU de Belo Horizonte com base nos modelos matemáticos e ensaios laboratoriais**

Regiões	Valor Poder Calorífico Superior Laboratório PCS (kcal/kg)	Poder Calorífico Superior – Modelos Matemáticos PCS (kcal/kg)	Modelo Matemático
Norte	2308,10	2630	Tokyo citado em Kathiravale et al (2003).
Oeste	2895,10	3587	Ali Khan citado em Kathiravale et al (2003).
Noroeste	2907,10	3469	Equação 1 citada em Kathiravale et al (2003).
Pampulha	3412,20	3669	Equação 2 citada em Kathiravale et al (2003).
Nordeste	3424,70	3545	Equação 6 citada em Kathiravale et al (2003).
Venda Nova	3996,10		
Centro sul 10/10	4087,60		
Barreiro	4197,90		
Centro sul	4239,00		
Leste	5437,80		
Média	3.690,60	3.567	Média (excluindo Tokyo)

Ensaio PCS: ASTM-2015

Fonte: Cançado et al (2007)

## CONCLUSÃO

Com os dados obtidos até o momento, observa-se que com a estratificação sócio-econômica das regionais e com a definição da coleta a partir desses dados, os resultados a serem obtidos serão os mais próximos possíveis da realidade local. A estratificação proposta baseia-se nos parâmetros fornecidos pelo IBGE para o ano 2000, considerando-se o salário mínimo vigente à época de R\$151,00.

Até o momento, a comparação dos valores de PCS por diferentes modelos matemáticos com base na composição gravimétrica valida os resultados laboratoriais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM D 2015. Gross Calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter. ASTM. Philadelphia, Pa. USA.
2. CANÇADO, C. J., LESSA, E. R., PARREIRA, F.V. Avaliação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos com características domiciliar e comercial da cidade de Belo Horizonte. In: Anais do 24 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte: ABES, 2007.
3. FOBIL et al (2005). Evaluation of municipal solid wastes (MSW) for utilisation in energy production in developing countries. In: Int. J. Environmental Technology and Management, Vol. 5, No. 1, 2005. p. 66 – 76.
4. KATHIRAVALE et al. (2003). Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. In: Fuel. 82 (2003). p. 1119 – 1125.
5. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Base de informações por setor censitário da área urbana dos distrito-sede - Censo demográfico 2000 - Resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.
6. EMPRESA DE INFORMÁTICA E INFORMAÇÃO DE BELO HORIZONTE – PRODABEL. Base Georreferenciada da Cidade de Belo Horizonte. Belo Horizonte: PRODABEL, 2007.